ساختاری جدید از ربات سیار چرخ‌دار چندحالته با کنترل ارتفاع در سطوح ناهموار*

(یادداشت پژوهشی)

مهدی بامداد[۱] آرمان مردانی[۲]

چکیده در این مقاله، توانایی حرکتی ربات سیار چرخ‌دار با فراهم آوردن ساختاری نوین افزایش می‌یابد. ساختار چندحالتهٔ پیشنهادی با توجه به طراحی خاص، توانایی تبدیل ربات دوچرخ به چهار چرخ را دارد. این طراحی توانایی حرکت هم‌زمان بدنهٔ ربات و جابه‌جایی بازو را هنگام حرکت در سطح ناهموار دارد. برخلاف اغلب ربات‌های سیار، ربات بدون استفاده از بازوان مدولار متصل به بدنه، قابلیت یک بازوی رباتیکی را در محور میانی دارد. این نقطه به‌عنوان مجری نهایی در محل یک مفصل غیرفعال است. از این‌رو می‌تواند حامل تجهیزات هدایت و بینایی ربات سیار باشد و بدون موتور محرکهٔ جدید از فرمان‌های کنترل ارتفاع پیروی کند. این طراحی خلاقانه و ساده می‌تواند عملکرد قابل قبولی را تضمین کند. در پایان، ویژگی حرکتی ربات در مسیرهای مختلف برای پنجه، روی سطوح ناهموار شبیه‌سازی می‌گردد.

واژه‌های کلیدی ربات سیار چرخ‌دار، چندحالته، طراحی حرکت، کنترل ارتفاع.

Multimode Wheeled Mobile Robot with Height Control on Uneven Surfaces

M. bamdad A. Mardani

Abstract *In this paper, the motion capability of wheeled mobile robot is increased by providing a new structure. Due to the special design, converting a two-wheeled robot to a four-wheeled robot is possible in the proposed multi-mode robot. This design has the ability to simultaneously and interchangeably provide locomotion and manipulation capability in motion on uneven terrain. Unlike most other mobile robot designs that have a separate manipulator arm module attached on top of the mobile platform, the central axis in this design can manipulate like a robotic arm. The robot midpoint as an end-effector is a passive joint. The part which could carry the guidance and visual equipments follows the height control, easily and without a new actuator. The basic requirement of stability and acceptable performance could be guaranteed through this simple, novel design. Finally, the simulation is used to study the robot's enhanced mobility characteristics through animations of different trajectories for end-effector on uneven terrain.*

Key Words Mobile Robot, Multimode, Locomotion, Height control.

★تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۲/۶ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۱۲/۱۱ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، استادیار دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود. Bamdad@shahroodut.ac.ir

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

مقدمه

امروزه حوزهٔ مربوط به کاوش‌گرهای فضایی به‌دلیل نیاز به بررسی سطح سیارات و اقمار، رو به گسترش است و در این میان ربات‌ها توانسته‌اند نقش مهمی ایفا نمایند [1]. ربات‌های کاوشگر تنها در کاربردهای فضایی استفاده نمی‌شوند بلکه برای جستجو در نقاطی که برای انسان پرخطر است؛ نیز به‌کار گرفته می‌شوند نظیر ربات‌های کف‌نورد نظامی [2]، ربات‌های کاوشگر در معادن زیرزمینی [3]. در این میان ربات‌های چرخ‌دار از اهمیت بیشتری برخوردارند و در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرند.

حرکت روی سطوح ناهموار چالش پیش روی ربات‌های سیار است. ربات‌های کاوشگر به‌دلیل تأمین پایداری بیشتر، از تعداد چرخ‌های بیشتری بهره می‌گیرند. در این میان ربات‌های چهارچرخ با محرک دیفرانسیلی مورد توجه بوده‌اند [4]. از طرفی، ربات‌های دوچرخ قابلیت پیمایش سریع و دور زدن در جا را دارند [5] و ربات‌های تک‌چرخ ساختاری ناپایدار دارند [6]. برای فهم حرکت روبات باید از محدودیت‌هایی که چرخ‌ها بر سر راه حرکت ایجاد می‌کنند شروع نمود. به همین دلیل در کاوش‌ها، بیشتر از ربات‌هایی با چهار چرخ و یا بیشتر استفاده می‌شود. سوال اصلی این‌جا است که آیا راهی وجود دارد که در هر یک از شرایط کاری و محیطی متفاوت از مزایای یک ساختار خاص رباتیکی بهره برد؟ پژوهشگران ساختارهای رباتیکی چند حالته را پیشنهاد داده‌اند. در یک نمونهٔ ساده، ربات‌های کوچک مدولار در قالب یک واحد هوشمند، توان اتصال به دیگر واحدها را دارند و می‌توانند ساختارهای کلی متفاوت با کارکرد متنوع را ایجاد کنند [7]. برای مثال اجزای ربات با قابلیت شکل‌گیری مجدد می‌توانند به یک چرخ تبدیل شوند [8]؛ و یا در نمونه‌ای دیگر، می‌توان به ربات‌هایی با قابلیت گام‌زنی و پیمایش چرخ‌دار اشاره داشت [9]. Rhex رباتی است که گام‌های آن هم‌زمان قابلیت پیمایش بر روی پا و نیم‌چرخ را دارا است [10-12].

ربات‌های چندحالته می‌توانند برای کاربردهای خاص نظیر پیمایش سطوح پله‌ای طراحی گردند [13]. این طراحی میتواند روی ساختار ترکیبی چرخ‌ها باشد [14]. عملکرد درخشان ربات‌های شنی چند کارکرد در کاوش، ثابت کرده است که آنها می‌توانند موانع را به‌خوبی پشت سرگذارند [15]. عموماً به‌منظور افزایش قابلیت‌های حرکتی ربات‌های سیار از ترکیبی از بازوان رباتیکی موازی و سری متصل به بدنه بهره برده می‌شود. بر خلاف این طرح‌ها که بازوی مدولار جداگانه دارند، حرکت هم‌زمان بدنهٔ ربات و جابه‌جایی بازوان در قالب یک ساختار یکپارچه، شدنی است. این ایده با طراحی مکانیکی خلاقانه در راستای افزایش توانایی ربات میسر می‌شود [16]. الگوبرداری از طبیعت در خلق طراحی‌های جدید انکار نشدنی است. چرخش بدن حلقه شدهٔ یک جانور خزنده، در مواردی می‌تواند ساختار چند کارکردی بدهد. با همین رویکرد، اخیراً ساختارهایی با قابلیت حلقه شدن در رباتیک نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند [17]. حتی در مواردی ربات‌هایی با ساختار گسسته عملکردهای متنوعی را فراهم می‌کنند [18]. چندین ربات سیار خودمختار کوچک در قالب یک همکاری رباتیکی، ساختارهای ترکیبی متفاوت با کارکرد متنوع ایجاد می‌کنند.

در این پژوهش، رباتی با قابلیت استفاده از دو شکل کاریِ دوچرخ و چهارچرخ پیشنهاد شده است اغلب ربات‌های دو و چهار چرخ طراحی‌شده، تنها از دستورات پیمایش سطح پیروی می‌کنند و توانایی پیروی از دستورات ناوبری ارتفاع را ندارند [19, 20]. این امر در مورد ربات‌های تک‌چرخ و یا کره نیز واضح‌تر است [21, 22]. در این طراحی، علاوه بر حرکت چندحالته، قابلیت پیمایش ارتفاع نیز فراهم می‌گردد. قابل ذکر است که این امر با تغییر ساختار، بدون به‌کارگیری موتور اضافی برای ربات ایجاد می‌شود. به‌صورت خلاصه نوآوری‌های این طراحی به شرح ذیل است:

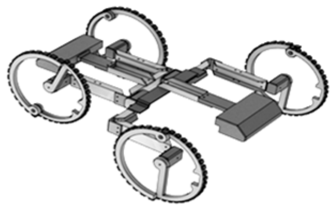
۱- فـراهم شـدن سـاختار دوحالتـه بـا حفـظ برتری‌های هر یک از ساختارها.
۲- افزودن قابلیت پیمایش ارتفاع.
۳- به‌سازی طراحی مراکز جرم ربات.
۴- کاستن اثر سطح در نوسانات ساختار.

در ادامـهٔ ایـن مقالـه، در قسـمت دوم بـه اصـول طراحی ربات سیار شامل طراحـی حرکـت و چیـدمان اجزا پرداخته می‌شود. ناوبری ربات سیار خودمختار بـا روش شناسـایی سـطح زمـین در بخـش سـوم معرفـی می‌شود. روابط سـینماتیک سـاختار در بخـش چهـارم استخراج می‌شود.

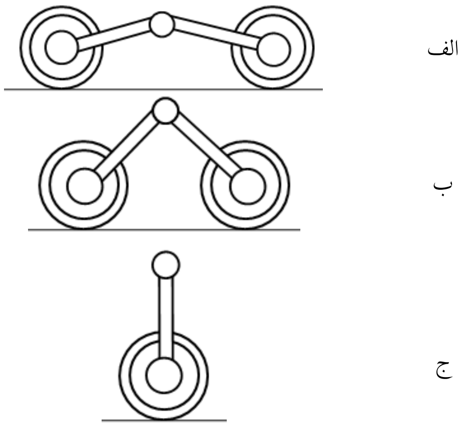
طراحی ساختار ربات سیار با مفصل غیرفعال

ربـات‌هـای چـرخ‌دار، دو نمونـهٔ متـداول دوچـرخ و چهارچرخ محرک دارند. در ساختار پیشنهادی، با اضافه کردن یک مفصل غیرفعال به میانهٔ بدنـهٔ ربـات، تنظـیم فاصله محور عقـب و جلـو و در نتیجـه تبـدیل ربـات چهارچرخ و دوچرخ امکان‌پذیر می‌گردد.

مودهای حرکتی. ساختار پیشنهاد شـده کـه در شـکل (۱) در نمای سه‌بعدی تصـویر شـده اسـت، مـی‌توانـد بدون هیچ تداخل هندسی با نزدیک شدن محورهـا بـه ربات دوچرخ بدل شود. این امر نه به‌دلیل موتور اضافهٔ دیگر، بلکه با کنترل سرعت چرخ‌هـای فعـال عقـب و جلو مطابق شکل (۲) صورت می‌گیرد. از سویی دیگـر با انتقال مناسب مرکز جرم ربات، عدم واژگونی ربـات تضمین می‌شود و ربات دوچرخ واژگون نمی‌شـود. در ادامه به تحلیل موارد فوق پرداخته می‌شود.



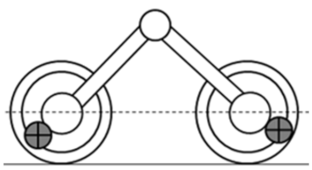
شکل ۱ نمای سه بعدی ربات



شکل ۲ نمای دوبعدی در مدهای حرکتی
(الف) چهارچرخ (ب) گذرا (ج) دوچرخ

موقعیت مراکز جرم. در این طراحـی، بـاتری و سـایر تجهیزات سنگین ربـات در دو قسـمت جلـو و عقـب ربات در امتداد هم جانمـایی شـده‌انـد. در حـالتی کـه دوچرخ ربات به‌هم نزدیک و یا هم‌محـور مـی‌گردنـد؛ ربات به ساختار دوچرخ میل مـی‌کنـد. بـه‌طـور کلـی، ربات‌های دوچرخ به‌دلیل موقعیت مرکز جـرم ناپایـدار هستند.

در ساختار دوچرخ، جابه‌جایی به‌گونه‌ای است کـه مرکز جرم به زیر محور چرخ‌ها منتقـل شـود. راسـتای مراکز چرخ در شکل (۳) نشان داده شـده اسـت مرکـز جرم تجهیزات جلو و عقـب نیـز بـا دایـرهٔ خاکسـتری مشخص شده است.

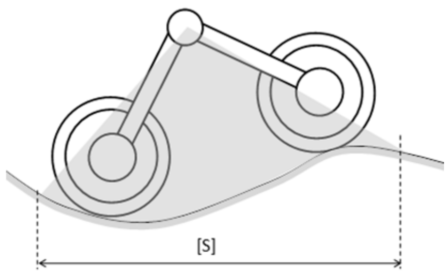


شکل ۳ نمایش محور میانی و مراکز جرم

ناوبری ربات سیار و شناسایی سطح زمین

در ربات‌هایی که با سطوح ناشناخته دست و پنجه نـرم می‌کنند، امکان تصور یک سطح کاری مشخص وجـود ندارد. حس‌گرهای متنوعی برای هـدایت ربـات سـیار

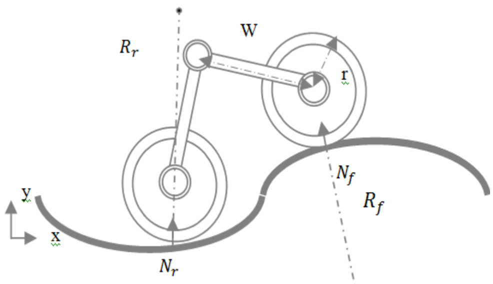
می‌توانند به‌کار گرفته شوند. اگرچه جای‌گزین کردن دوربین با حسگرهای شتاب چرخ‌ها برای یافتن مشخصات حرکتی نظیر موقعیت ربات سیار امکان‌پذیر است، لیکن دریافت اطلاعات سطح با شتاب‌سنج میسر نیست. سامانهٔ بینایی در این پژوهش برای ربات سیار پیشنهاد شده است. دلیل اصلی استفاده از پویش سطح، این است که ربات در الگوریتم حرکتی به شعاع انحنا و نرمال سطح نیز نیاز دارد. یک دوربین جفت شده (دو دوربین در کنار هم با فاصله‌ای معین) با قانون اختلاف‌منظر به‌راحتی تمام داده‌های سطح را استخراج می‌کند. هدایت نقطهٔ میانی در مسیر دل‌خواه نیز نیازمند شناسایی سطح است. در مدل‌سازی انجام‌شده، داده‌های سطح در یک ماتریس به نام ماتریس پویش (اسکن) [s] ذخیره می‌گردد؛ که در محاسبات به‌کار گرفته می‌شود.



شکل ۴ نمایش پویش سطح

الگوریتم شناسایی سطح. تحلیل حرکت ربات‌های سیار در یک محیط هموار و با فرض عدم لغزش چرخ‌ها، حتی در فضای سه‌بعدی دشوار نیست. در این مقاله، سطح حرکت ناشناخته و ناهموار است و هم‌چنین حرکت مفصل غیرفعال متأثر از دیگر مفاصل فعال تحلیل می‌شود. بسیاری از کنترل‌های ربات‌های سیار در سطح سینماتیک طرح‌ریزی شده‌اند و سرعت‌های ربات ورودی‌های کنترلی هستند. با چشم‌پوشی از نامعینی پارامتری سیستم دینامیکی ربات، فرض می‌گردد که مدل دینامیکی می‌تواند سرعت‌های مورد نیاز کنترلر سینماتیکی را در بازهٔ زمانی فراهم کند. نمای کلی از مسأله سینماتیک به‌همراه پارامترها در شکل (۵) نمایش داده شده و در جدول (۱) شرح داده شده است.

برای توصیف حرکت ربات بر روی مسیر ناهموار، محدودیت‌هایی را که هر چرخ بر حرکت اعمال می‌کند باید در نظر گرفت: ۱- صفحهٔ چرخ‌ها همیشه عمودی باقی خواهد ماند. ۲- در هر حالتی فقط یک نقطهٔ برخورد بین چرخ و زمین وجود دارد. ۳- چرخ‌ها در نقطهٔ تماس سر نمی‌خورند و فقط حرکت چرخشی دارند [23]. با توجه به فرض عدم لغزش، میزان دوران چرخ‌ها ارتباط مستقیمی با مسافت طی‌شده دارد و می‌توان مقادیر شعاع انحنا و بردار نرمال سطح را یافت. بردار نرمال سطح منجر به یافتن مرکز چرخ می‌شود.



شکل ۵ نمایش پارامترهای هندسی

جدول ۱ شرح پارامترهای سینماتیک

پارامتر	توضیحات
R_r	شعاع انحنای چرخ عقب
R_f	شعاع انحنای چرخ جلو
x_r	مؤلفهٔ افقی مرکز چرخ عقب
x_f	مؤلفهٔ افقی مرکز چرخ جلو
y_r	مؤلفهٔ عمودی مرکز چرخ عقب
y_f	مؤلفهٔ عمودی مرکز چرخ جلو
N_{xr}	مؤلفهٔ افقی بردار نرمال چرخ عقب
N_{yr}	مؤلفهٔ عمودی بردار نرمال چرخ عقب
N_{xf}	مؤلفهٔ افقی بردار نرمال چرخ جلو
N_{yf}	مؤلفهٔ عمودی بردار نرمال چرخ جلو

داده‌های حسگر (ماتریس [s]) به دو دسته داده‌های برداشته‌شده و داده‌های محاسبه‌شده تقسیم می‌شوند. داده‌های برداشته‌شده شامل مکان، طول و عرض نقاط یک محدوده از سطح زیر ربات در مکان پیمایش و داده‌های محاسبه‌شده شامل شعاع انحنا و بردار نرمال سطوح است.

$$s = [R_r\ R_f\ x_r\ x_f\ y_r\ y_f\ N_{xr}\ N_{yr}\ N_{xf}\ N_{yf}] \quad (۱)$$

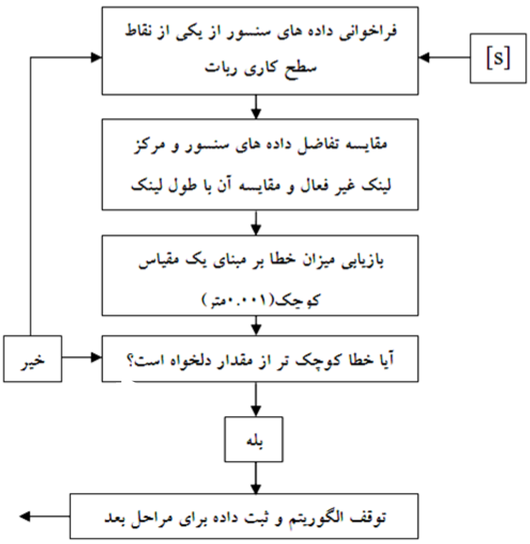
در گام اول، بنا بر موقعیت دل‌خواه نقطهٔ میانی، مکانی برای مرکز هر کدام از چرخ‌ها یافت می‌شود؛ که این کار با جستجو در درایه‌های بردار حسگر انجام می‌پذیرد؛ به‌گونه‌ای که قیود هندسی شامل طول میله‌بندی را برآورده کند. شعاع انحنا و نرمال مسیر در هر لحظه با Δ اپراتور مشتق‌گیر در فضای گسسته، قابل محاسبه است.

$$\begin{cases} R_r \approx \dfrac{\sqrt{\left(\dfrac{\Delta {y_r}^2}{\Delta x_r}+1\right)^3}}{\dfrac{\Delta^2 y_r}{\Delta {x_r}^2}} \\ R_f \approx \dfrac{\sqrt{\left(\dfrac{\Delta {y_f}^2}{\Delta x_f}+1\right)^3}}{\dfrac{\Delta^2 y_f}{\Delta {x_f}^2}} \end{cases} \quad (۲)$$

$$\begin{cases} N_r \approx \dfrac{[\frac{-\Delta y_r}{\Delta x_r}, 1]^T}{\left|\left[\frac{-\Delta y_r}{\Delta x_r}, 1\right]\right|} \\ N_f \approx \dfrac{[\frac{-\Delta y_f}{\Delta x_f}, 1]^T}{\left|\left[\frac{-\Delta y_f}{\Delta x_f}, 1\right]\right|} \end{cases} \quad (۳)$$

سپس با استفاده از الگوریتم کلی شکل (۶) نقاط مرکز چرخ‌ها محاسبه می‌شود. این روند در هر فرمان کنترل صورت می‌پذیرد. به‌دلیل انتقال این داده‌ها از حسگر و وجود یک حلقهٔ داخلی، برای حقیقی ساختن مدل مکاترونیکی به یک تأخیر زمانی نیاز است که در مدل‌سازی برابر ۰٫۰۰۴ ثانیه در نظر گرفته می‌شود و هر دادهٔ جدید هم در این فاصلهٔ زمانی برداشت می‌گردد.

از جایی که ربات در الگوریتم حرکتی به شعاع انحنا و نرمال سطح هم نیاز دارد، دریافت اطلاعات سطح با شتاب‌سنج میسر نیست. تمام داده‌های سطح توسط یک جفت دوربین با فاصله‌ای معین، با قانون اختلاف منظر به‌راحتی استخراج می‌شود. در گام سوم سرعت مرکز چرخ‌ها به‌وسیلهٔ مشتق در فضای گسسته به‌دست می‌آیند. در گام چهارم سرعت مرکز چرخ‌ها بنا بر شعاع انحنا به سرعت دورانی چرخ نسبت به موتورها تبدیل می‌شود.



شکل ۶ الگوریتم یافتن نقطه مرکز چرخ‌ها

در این الگوریتم منظور از توقف در انتهای مراحل، توقف دائمی حرکت نبوده و در واقع الگوریتم در هر بازه کوتاه زمانی و در هر دوره زمانی که ربات در حال پیمایش می‌باشد فعال است. توقف الگوریتم به معنای برآورده شدن قیود و آمادگی برای اخذ ورودی جدید و کاهش خطا است. از آن‌جا که چرخ‌های ربات در فضای ناهموار و بر روی سطوحی با شعاع‌های انحنای گوناگون حرکت می‌کنند؛ سرعت دورانی مرکز چرخ علاوه بر شعاع چرخ و سرعت خطی مرکز به مشتق

دوم سطح (کوژی سطح) و مشتق اول و شعاع انحنای آن نیز وابسته است.

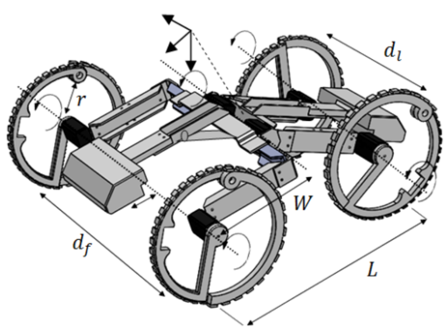
$$\begin{cases} \dot{\alpha} = \frac{R-r}{R}\dot{\theta} \ \text{if} \ \frac{\Delta^2 y}{\Delta x^2} > 0 \\ \dot{\alpha} = \frac{R+r}{R}\dot{\theta} \ \text{if} \ \frac{\Delta^2 y}{\Delta x^2} < 0 \end{cases} \quad (۴)$$

مدل‌سازی سینماتیک ربات سیار. به‌منظور تحلیل حرکت طرح پیشنهادی ربات سیار، پارامترهای نمایش داده شده در شکل (۷)، در پیوست– الف بیان شده است. مرکز مستطیل بین مراکز چهارچرخ، مبدأ محاسبات قرار گرفته است؛ و تمامی اجزای ربات نسبت به این مبدأ سنجیده می‌شوند. به‌دلیل موقعیت‌دهی نقطهٔ میانی به‌عنوان مؤثرترین مکان ربات سیار در عملیاتی نظیر کاوش، سینماتیک معکوس ربات بررسی می‌شود.

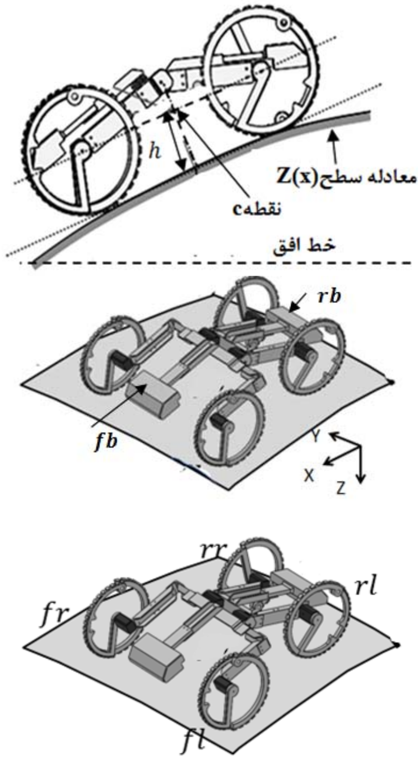
سرعت مرکز هندسی چرخ‌ها براساس سرعت بردار عمود سطح و سرعت چرخ‌ها با ماتریس ژاکوبین بیان می‌شود.

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{U}_r \\ \dot{U}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\emptyset}_w \\ \dot{N}_s \end{bmatrix} \\ J_{11} \in R^{4\times4}, J_{22} \in R^{3\times4}, J_{12} \in R^{4\times4}, J_{21} \in R^{3\times4} \\ \dot{U}_r \in R^{4\times1}, \dot{U}_f \in R^{3\times1}, \dot{\emptyset}_w \in R^{4\times4}, \dot{N}_s \in R^{4\times4} \end{cases}$$

$$[\dot{U}_r] = [\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{\theta}_z \quad \dot{h}]^T$$
$$[\dot{U}_f] = [\dot{z} \quad \dot{\theta_x} \quad \dot{\theta_y}]^T$$
$$\dot{\emptyset}_w = [\dot{\theta_{rr}} \quad \dot{\theta_{rl}} \quad \dot{\theta_{fr}} \quad \dot{\theta_{fl}}]^T$$
$$\dot{N}_s = [\dot{N}_x \quad \dot{N}_y \quad \dot{N}_z \quad \dot{G}_1]^T$$



الف



ب
ج
د

شکل ۷ نمایش پارامترهای سینماتیک، (الف)ابعاد محورها،(ب) نمای جانبی صفحه‌ای،(ج) موقعیت پل عقب و جلو، (د) اندیس چهارچرخ

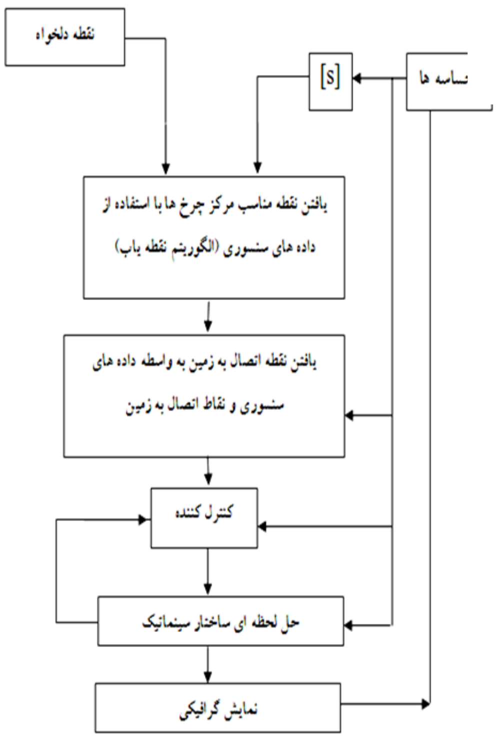
که $\dot{\emptyset}_w$ بردار سرعت دورانی چرخ‌ها، $\dot{N}_s$ بردار سرعت مشخصات سطح در تماس با چرخ است. $\dot{U}_r$ شامل سرعت‌های مرکز چهار چرخ $\dot{x}$، $\dot{y}$ و $\dot{\theta}_z$ سرعت دورانی حول محور z ، به‌همراه سرعت عمودی نقطهٔ میانی $\dot{h}$ است. $\dot{U}_f$ بردار مشخصات سینماتیک ربات شامل $\dot{z}$ سرعت عمودی سطح گذرنده از مرکز چهارچرخ، دوران حول محور x و دوران حول محور y است. جزئیات درایه‌های ماتریس‌ها در پیوست آورده شده است. در پایان بردار سرعت شش درجه آزادی هر بخش $\dot{X}_{T_i}$ با تلفیق ماتریس‌های ژاکوبین حاصل می‌شود.

$$\begin{cases} [\dot{X}_{T_i}] = [J_c + J_{in_i}] \begin{bmatrix} \dot{\emptyset}_w \\ \dot{N}_s \end{bmatrix} \\ J_c \in R^{6\times8}, J_{in_i} \in R^{6\times8}, \dot{\emptyset}_w \in R^{4\times1}, \dot{N}_s \in R^{4\times1}, \dot{X}_{T_i} \in R^{6\times1} \end{cases} \quad (۵)$$

کنترل

کنترل‌کننده مختصات مکان هندسی مرکز چرخ‌ها را دریافت می‌کند و با مقادیر لحظه‌ای که از حل سینماتیک به‌دست می‌آید، مقایسه می‌کند و در نتیجه پیروی از مسیر مناسب حاصل می‌شود. در این مقاله از کنترلر خطی ساز پسخورد استفاده می‌شود. ورودی آن، خطای مکان مسیر ردگیری در لحظه با مقدار دریافت‌شده از مدل سینماتیک می‌باشد؛ و خروجی آن سرعت زاویه‌ای چرخ‌های جلو و عقب است.

الگوریتم نرم‌افزار واسط در شکل (۸) با شبیه‌سازی محیط حقیقی تبیین شده است. کنترل‌کنندۀ PID سرعت را بر روی چرخ‌ها کنترل می‌کند. درحالی که سرعت به‌عنوان سیگنال کنترلی به چرخ‌ها اعمال می‌گردد، حسگرها داده‌های موقعیت را برای کنترل‌کننده به‌عنوان پسخورد می‌فرستند. هم‌چنین در این مقاله، تأخیر مجموعۀ سخت‌افزار (دوربین) و نرم‌افزار پردازش (الگوریتم) در نظر گرفته شده است.



شکل ۸ برنامۀ شبیه‌ساز کارکرد ربات

شبیه‌سازی حرکت ربات

هدف از این طرح، کنترل موقعیت مفصل میانی در فضای کاری ربات سیار است. با کنترل سینماتیک ربات سیار تأثیر ناهمواری سطح، با تنظیم ارتفاع نقطه میانی ربات حذف می‌شود. کنترل ردگیری این نقطه، با هدف موقعیت‌دهی این نقطۀ مرجع ربات است.

معرفی نمونه مورد بررسی و طرح مسأله. مقادیر عددی متغیرهای سینماتیکی و جرم ربات در شبیه‌سازی در جدول (۲) آورده شده‌است. مطابق الگوریتم، ابتدا محیط اطراف ربات کاوش می‌شود و پس از استخراج داده‌های سطح و محاسبات تکمیلی، در یک ماتریس ذخیره می‌گردد. نقطه میانی حامل دوربین و محل استقرار مرکز چرخ‌ها شناسایی می‌شود و در ادامه سرعت‌های زاویه محاسبه و به موتورهای ربات تحت کنترل PID اعمال می‌شود.

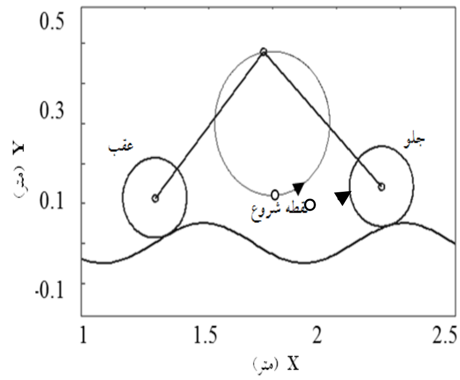
جدول ۲ مقادیر عددی پارامترهای ربات در شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار
شعاع چرخ‌های ربات	۱۰سانتی متر
طول بازوی عقب و جلو	۵۰ سانتی متر
فاصلۀ چرخ‌های جلو	۶۰سانتی متر
فاصله چرخ‌های عقب	۳۰سانتی متر
جرم چرخ‌ها	۰/۵کیلوگرم
جرم بازوها	۳ کیلوگرم

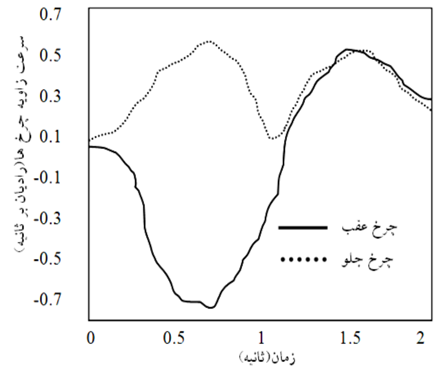
رفع اثر اغتشاش سطح و پیروی از مسیر هم‌زمان. در آزمون پیش رو سعی شده است تا با در نظر گرفتن مسیر مطلوب مستقیم نشان داده‌شده در شکل (۱۰) تأثیرات سطح محو شود. معادلۀ سطح ناهموار به‌صورت سینوسی در نظر گرفته می‌شود:

$$Z = 0.05\mathrm{Sin}(2x) \qquad (۱)$$

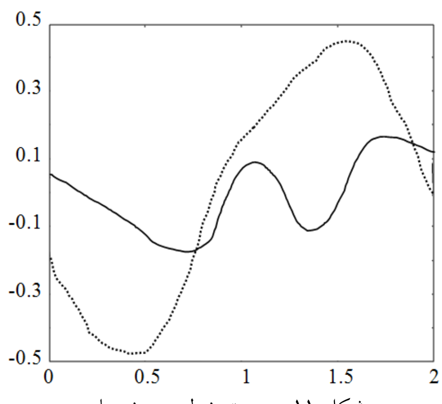
مسیر دایره‌ای به شعاع ۰/۱ متر برای نقطهٔ میانی طراحی شده است که در شکل (۹) به‌نمایش در آمده است. سرعت دورانی چرخ‌ها در شکل (۱۰) و هم‌چنین سرعت خطی چرخ عقب و جلو به‌ترتیب در شکل‌های (۱۲ و ۱۱) نشان داده می شود.



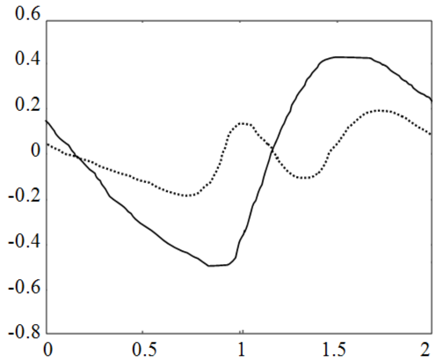
شکل ۹ مسیر دایره‌ای نقطهٔ میانی



شکل ۱۰ سرعت دورانی چرخ‌ها



شکل ۱۱ سرعت خطی چرخ جلو



شکل ۱۲ سرعت خطی چرخ عقب

نتیجه‌گیری

به‌منظور افزایش قابلیت‌های حرکتی ربات سیار، استفاده از بازوان مدولار موازی و سری متصل به بدنه رایج است. در این مقاله حرکت هم‌زمان بدنهٔ ربات و جابه‌جایی بازوان در قالب یک ساختار یک‌پارچه پیشنهاد شد. در این طراحی، محور میانی با قابلیت یک بازوی رباتیکی به‌عنوان مجری نهایی مطرح است. نقطهٔ میانی در محل یک مفصل غیرفعال است و می‌تواند حامل تجهیزات هدایت و بینایی ربات سیار باشد. این ربات با تعویض مودهای حرکتی خود توانسته است علاوه بر پیروی از فرمان‌های سطحی از فرمان‌های ارتفاع نیز پیروی کند؛ و دو درجه آزادی را بدون افزایش تعداد موتورها برآورده سازد. نکتهٔ دیگر توان غلبه بر ناهمواری‌های دامنهٔ بالای سطح است.

فهرست علائم

r	شعاع چرخ‌های ربات
R	ماتریس دوران کل ربات حول محورهای موازی محور مختصات اصلی در نقطهٔ c
L	فاصلهٔ محور چرخ‌های عقب و جلو
W	طول بازوی عقب و جلو (با هم برابر)
$Z(x)$	تابع ارتفاع سطح در هر نقطه بر مبنای مختصات x
J_c	ماتریس ژاکوبین مرکز چهار چرخ نسبت

	به مرجع ثابت
$J_{in_{rb}}$	ماتریس ژاکوبین مرکز جرم پل عقب نسبت به مرکز چهار چرخ
$J_{in_{fb}}$	ماتریس ژاکوبین مرکز جرم پل جلو نسبت به مرکز چهار چرخ
$J_{in_{rr}}$	ماتریس ژاکوبین مرکز جرم چرخ عقب- راست نسبت به مرکز چهار چرخ
$J_{in_{fr}}$	ماتریس ژاکوبین مرکز جرم چرخ جلو- راست نسبت به مرکز چهار چرخ
$J_{in_{rl}}$	ماتریس ژاکوبین مرکز جرم چرخ عقب- چپ نسبت به مرکز چهار چرخ
$J_{in_{fl}}$	ماتریس ژاکوبین مرکز جرم چرخ جلو- چپ نسبت به مرکز چهار چرخ
θ_x	زاویهٔ دوران مرکز چرخ‌های ربات حول محورx متصل به ربات
θ_y	زاویهٔ دوران مرکز چرخ‌های ربات حول محورy متصل به ربات
θ_z	زاویهٔ دوران مرکز چرخ‌های ربات حول محورz متصل به ربات
x	جابه‌جایی مرکز چهار چرخ ربات نسبت به مرجع لخت در جهت x
y	جابه‌جایی مرکز چهار چرخ ربات نسبت به مرجع لخت در جهت y
z	جابجایی مرکز چهار چرخ ربات نسبت به مرجع لخت در جهت z
R_X	ماتریس دوران ربات حول x متصل به ربات موازی محور x
R_y	ماتریس دوران ربات حول y متصل به ربات موازی محور y
R_z	ماتریس دوران ربات حول z متصل به ربات موازی محور z
H	ارتفاع مفصل تقاطع دو پل نسبت به مراکز چرخ
N	بردار عمود بر سطح در هر لحظه

مراجع

1. Bares, J. and Whittaker, W, "Configuration of an autonomous robot for mars exploration", 1988 Year End Report Autonomous Planetary Rover at Carnegie Mellon, No. 43, (1988).
2. Sharkey, N., "Cassandra or false prophet of doom: AI robots and war", *Intelligent Systems*, IEEE, Vol. 23, No. 4, pp. 14-17, (2008).
3. Corke, P.I., Winstanley, G.J. and Roberts, J.M., "*Modeling and Control of a 3500 tonne Mining Robot*", In Experimental Robotics, pp. 262-274, Springer Berlin Heidelberg, (1998).
4. Yi, Y., Mengyin, F., Hao, Z. andGuangming, X., "Control laws design and validation of autonomous mobile robot off-road trajectory tracking based on ADAMS and MATLAB co-simulation platform", *Applications of MATLAB in Science and Engineering*, pp. 353-370. (2011).
5. Kim, Y., Kim, S.H., and Kwak, Y.K., "Dynamic analysis of a nonholonomic two-wheeled inverted pendulum robot", *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 44, No. 1, pp. 25-46. (2005).
6. Halme, A., Schonberg, T. and Wang, Y., "Motion control of a spherical mobile robot", Advanced Motion Control, AMC'96-MIE. IEEE Proceedings, 1996 4th International Workshop, Vol. 1, pp. 259-264, (1996).
7. Cohen, R., Lipton, M. G., Dai, M. Q. and Benhabib, B., "Conceptual design of a modular robot", *Journal of Mechanical Design*, pp. 117-125, (1992).
8. Shen, W.M., Krivokon, M., Chiu, H., Everist, J., Rubenstein, M. and Venkatesh, J., "Multimode locomotion via Super Bot reconfigurable robots", *Autonomous Robots*, Vol. 20, pp. 165-177. (2006).

9. Endo, G. and Hirose, S., "Study on roller-walker-energy efficiency of roller-walk", *In Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference*, pp. 5050-5055, (2011).
10. Saranli, U., Buehler, M. and Koditschek, D.E., "RHex: A simple and highly mobile hexapod robot", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 20, No. 7, pp. 616-631, (2001).
11. Altendorfer, R., Moore, N., Komsuoglu, H., Buehler, M., Brown Jr, H.B., McMordie, D., ...and Koditschek, D.E., "RHex: a biologically inspired hexapod runner", *Autonomous Robots*, Vol. 11, No. 3, pp. 3207-213, (2001).
12. Moore, E.Z., Campbell, D., Grimminger, F. and Buehler, M., "Reliable stair climbing in the simple hexapod'RHex", In Robotics and Automation, Proceedings. ICRA'02. *IEEE International Conference*, Vol. 3, pp. 2222-2227, (2002).
13. Vadakkepat, P., Peng, X., Quek, B.K. and Lee, T.H., "Evolution of fuzzy behaviors for multi-robotic system. Robotics and Autonomous Systems", Vol. 55, pp. 146-161, (2007).
14. Gaston, J., Raahemifar, K. and Hiscocks, P.A., "Cooperative network of reconfigurable stair-climbing robots", In Circuits and Systems, ISCAS 2006. Proceedings. IEEE International Symposium, p. 4, (2006)
15. Dalvand, M.M. and Moghadam, M.M., "Stair climber smart mobile robot (MSRox)", Autonomous robots, Vol. 20, No. 1, pp. 3-14, (2006).
16. Ben-Tzvi, P., Goldenberg, A.A. and Zu, J.W., "Design and analysis of a hybrid mobile robot mechanism with compounded locomotion and manipulation capability", *Journal of Mechanical Design*, Vol. 130, 072302, (2008).
17. Armour, R.H. and Vincent, J.F., "Rolling in nature and robotics", *A review Journal of Bionic Engineering*, Vol. 3, No. 4, pp. 195-208, (2006).
18. O'Grady, R., Groß, R., Christensen, A.L. and Dorigo, M., "Self-assembly strategies in a group of autonomous mobile robots", *Autonomous Robots*, Vol. 28, No. 4, pp. 439-455. (2010).
19. Klancar, G., Matko, D. and Blazic, S., "Mobile robot control on a reference path", In Intelligent Control, *Mediterrean Conference*, Proceedings of the IEEE International Symposium on, Mediterrean Conference on Control and Automation, pp. 1343-1348, (2005).
20. Martins, F.N., Celeste, W.C., Carelli, R., Sarcinelli-Filho, M. and Bastos-Filho, T.F., "An adaptive dynamic controller for autonomous mobile robot trajectory tracking", *Control Engineering Practice*, Vol. 16, pp. 1354-1363, (2008).
21. Zhang, S., Fang, X., Zhou, S. and Du, K. Kinetic, "Model for a Spherical Rolling Robot with Soft Shell in a Beeline Motion", *Journal of Multimedia*, Vol. 9, No.4, pp. 223-229, (2014).
22. Suomela, J. and Ylikorpi, T., "Ball-shaped robots an historical overview and recent developments at TKK", *In Field and service robotics*, pp. 343-354, Springer Berlin Heidelberg, (2006).
23. Murray, D. and Little, J.J., "Using real-time stereo vision for mobile robot navigation", Autonomous Robots, Vol. 8, No. 2, pp. 161-171, (2000).

پیوست

$$J_{11}=\begin{bmatrix} r\frac{R_{13}}{4} & r\frac{R_{13}}{4} & r\frac{R_{13}}{4} & r\frac{R_{13}}{4}\\ r\frac{R_{23}}{4} & r\frac{R_{23}}{4} & r\frac{R_{23}}{4} & r\frac{R_{23}}{4}\\ \frac{r}{d_r} & \frac{-r}{d_r} & \frac{r}{d_f} & \frac{-r}{d_f}\\ -rG_3 & -rG_3 & rG_3 & rG_3\end{bmatrix}$$

که ماتریس ژاکوبین سرعت زاویه‌ای چرخ‌ها ($[\dot\theta_{rr} \quad \dot\theta_{rl} \quad \dot\theta_{fr} \quad \dot\theta_{fl}]^T$) و سرعت پارامترهای ربات ($[\dot x \quad \dot y \quad \dot\theta_z \quad \dot h]^T$) است.

$$J_{12}=\text{zero}(4,4)$$
$$J_{21}=\text{zero}(3,4)$$

$$J_{22}=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1\\ \frac{\partial G_4}{\partial N_x} & \frac{\partial G_4}{\partial N_y} & \frac{\partial G_4}{\partial N_z} & 0\\ \frac{\partial G_5}{\partial N_x} & \frac{\partial G_5}{\partial N_y} & \frac{\partial G_5}{\partial N_z} & 0\end{bmatrix}$$

که ماتریس ژاکوبین سرعت مشخصات نقطه اتصال به سطح($[\dot N_x \quad \dot N_y \quad \dot N_z \quad \dot G_1]^T$) و سرعت مشخصات سینماتیک ربات($[\dot z \quad \dot\theta_x \quad \dot\theta_y]$) است.

$$R=R_Z\times R_Y\times R_X=\begin{bmatrix} c_yc_z & c_zs_ys_x-c_xs_z & c_zs_yc_x+s_xs_z\\ c_ys_z & s_xs_ys_z+c_xc_z & c_xs_ys_z-c_zs_x\\ s_y & c_ys_x & c_yc_x\end{bmatrix}$$

$$c_x=\cos\theta_x\ ,\qquad s_x=\sin\theta_x$$

$$\vec{N}=\left[N_x\ N_y\ N_z\right]^T$$

که نشانگر بردار نرمال سطح است.

$$\vec{N}=\frac{\left(\frac{\partial G_6}{\partial x},\frac{\partial G_6}{\partial y},\frac{\partial G_6}{\partial z}\right)}{\left|\left(\frac{\partial G_6}{\partial x},\frac{\partial G_6}{\partial y},\frac{\partial G_6}{\partial z}\right)\right|}$$

$$\left[\dot X_{T_i}\right]_{6\times1}=\left[\dot x \quad \dot y \quad \dot\theta_z \quad \dot z \quad \dot\theta_x \quad \dot\theta_y\right]^T$$

$$J_c=\begin{bmatrix} \frac{R_{13}}{4} & \frac{R_{13}}{4} & \frac{R_{13}}{4} & \frac{R_{13}}{4} & 0 & 0 & 0 & 0\\ \frac{R_{23}}{4} & \frac{R_{23}}{4} & \frac{R_{23}}{4} & \frac{R_{23}}{4} & 0 & 0 & 0 & 0\\ \frac{r}{d_r} & \frac{-r}{d_r} & \frac{r}{d_f} & \frac{-r}{d_f} & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial G_4}{\partial N_x} & \frac{\partial G_4}{\partial N_y} & \frac{\partial G_4}{\partial N_z} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial G_5}{\partial N_x} & \frac{\partial G_5}{\partial N_y} & \frac{\partial G_5}{\partial N_z} & 0\end{bmatrix}$$

ژاکوبین مشخصات مرکز ربات نسبت به مشخصات سطح و سرعت های دورانی.

$$J_{in_{fl}}=\begin{bmatrix} \frac{-r}{2} & \frac{-r}{2} & \frac{r}{2} & \frac{r}{2} & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ \frac{-\partial G_1}{\partial\theta_{rr}} & \frac{-\partial G_1}{\partial\theta_{rl}} & \frac{-\partial G_1}{\partial\theta_{fr}} & \frac{-\partial G_1}{\partial\theta_{fl}}+1 & 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

ژاکوبین چرخ جلو-چپ نسبت به نقطه میانی چرخ‌ها.

$$J_{in_{fr}}=\begin{bmatrix}\frac{-r}{2} & \frac{-r}{2} & \frac{r}{2} & \frac{r}{2} & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0&0&0&0&0&0&0&0\\ 0&0&0&0&0&0&0&0\\ 0&0&0&0&0&0&0&0\\ 0&0&0&0&0&0&0&0\\ \frac{-\partial G_1}{\partial \theta_{rr}} & \frac{-\partial G_1}{\partial \theta_{rl}} & \frac{-\partial G_1}{\partial \theta_{fr}}+1 & \frac{-\partial G_1}{\partial \theta_{fl}} & 0&0&0&0\end{bmatrix}$$

ژاکوبین چرخ جلو–راست نسبت به نقطه میانی چرخ‌ها

$$J_{in_{rr}}=\begin{bmatrix}\frac{r}{2} & \frac{r}{2} & \frac{-r}{2} & \frac{-r}{2} & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0&0&0&0&0&0&0&0\\ 0&0&0&0&0&0&0&0\\ 0&0&0&0&0&0&0&0\\ 0&0&0&0&0&0&0&0\\ \frac{-\partial G_1}{\partial \theta_{rr}}+1 & \frac{-\partial G_1}{\partial \theta_{rl}} & \frac{-\partial G_1}{\partial \theta_{fr}} & \frac{-\partial G_1}{\partial \theta_{fl}} & 0&0&0&0\end{bmatrix}$$

ژاکوبین چرخ عقب–راست نسبت به نقطه میانی چرخ.

$$J_{in_{rl}}=\begin{bmatrix}\frac{r}{2} & \frac{r}{2} & \frac{-r}{2} & \frac{-r}{2} & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0&0&0&0&0&0&0&0\\ 0&0&0&0&0&0&0&0\\ 0&0&0&0&0&0&0&0\\ 0&0&0&0&0&0&0&0\\ \frac{-\partial G_1}{\partial \theta_{rr}} & \frac{-\partial G_1}{\partial \theta_{rl}}+1 & \frac{-\partial G_1}{\partial \theta_{fr}} & \frac{-\partial G_1}{\partial \theta_{fl}} & 0&0&0&0\end{bmatrix}$$

ژاکوبین چرخ عقب–چپ نسبت به نقطه میانی چرخ‌ها.

$$J_{in_{fb}}=\begin{bmatrix}\frac{-r}{4} & \frac{-r}{4} & \frac{r}{4} & \frac{r}{4} & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0&0&0&0&0&0&0&0\\ 0&0&0&0&0&0&0&0\\ r\frac{\partial G_2}{\partial \theta_{rr}} & r\frac{\partial G_2}{\partial \theta_{rl}} & r\frac{\partial G_2}{\partial \theta_{fr}} & r\frac{\partial G_2}{\partial \theta_{fl}} & 0&0&0&0\\ 0&0&0&0&0&0&0&0\\ r\frac{-\partial G_1}{\partial \theta_{rr}} & r\frac{-\partial G_1}{\partial \theta_{rl}} & r\frac{-\partial G_1}{\partial \theta_{fr}} & r\frac{-\partial G_1}{\partial \theta_{fl}} & 0&0&0&0\end{bmatrix}$$

$$J_{in_{rb}}=\begin{bmatrix}\frac{r}{4} & \frac{r}{4} & \frac{-r}{4} & \frac{-r}{4} & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0&0&0&0&0&0&0&0\\ 0&0&0&0&0&0&0&0\\ r\frac{\partial G_2}{\partial \theta_{rr}} & r\frac{\partial G_2}{\partial \theta_{rl}} & r\frac{\partial G_2}{\partial \theta_{fr}} & r\frac{\partial G_2}{\partial \theta_{fl}} & 0&0&0&0\\ 0&0&0&0&0&0&0&0\\ r\frac{\partial G_1}{\partial \theta_{rr}} & r\frac{\partial G_1}{\partial \theta_{rl}} & r\frac{\partial G_1}{\partial \theta_{fr}} & r\frac{\partial G_1}{\partial \theta_{fl}} & 0&0&0&0\end{bmatrix}$$

$$G_1=\cos^{-1}(\frac{L}{2W})$$
$$G_2=\sqrt{1-\frac{L^2}{4W^2}}$$
$$G_3=\frac{L}{4\sqrt{W^2-\frac{L^2}{4}}}$$
$$G_4=\cos^{-1}(\frac{N_z}{\cos(G_5)})$$
$$G_5=\tan^{-1}(\frac{\sin(\theta_y)N(2)+\cos(\theta_y)N(1)}{N(3)})$$
$$G_6=Z(x)$$